HOE KAN DE OCEAAN OPLOSSINGEN BIEDEN BIJ HET VERLAGEN VAN HET VERSTERKTE BROEIKASEFFECT?

Björn Jansen
6Vb
Januari 2022

VOORWOORD

Mijn naam is Björn Jansen en ik ben leerling op het Wolfert Dalton in Rotterdam. Het profielwerkstuk vormt de eindopdracht van 6 VWO. Van jongs af aan ben ik al geïnteresseerd geweest in de natuur. Toen ik ouder werd, begon ik steeds meer de invloeden van de klimaatverandering op in het dagelijks leven op te merken. Het was dan ook vanzelfsprekend dat het onderwerp van mijn profielwerkstuk over klimaatverandering zou gaan.

Ik ben mij meer en meer gaan verdiepen in de oorzaken en gevolgen van klimaatveranderingen en ben ik erachter gekomen dat dit de richting is waarin ik wil gaan studeren. Ik heb me namelijk ingeschreven voor de studie Future Planet Studies aan de Universiteit van Amsterdam.

Na het lezen van het boek 'A life on our planet' van David Attenborough, is mijn interesse gewekt op de oceaan en de invloed die het heeft op de klimaatverandering. Omdat dit mijn persoonlijke interesse heeft, heb ik ervoor gekozen dit profielwerkstuk zelfstandig te maken.

Dit onderzoek heb ik veel gehad aan de gesprekken met mijn begeleider de heer Braumuller en de heer Dikkerboom van het Procescollege van het STC in Brielle. Daarnaast wil ik natuurlijk mijn ouders bedanken voor hun steun. Zij hebben mij gemotiveerd mijn eigen pad te kiezen.

Bron foto op titelpagina: (Okon, The Current State of Coral Reefs, 2019)

SAMENVATTING

De laatste jaren lijkt de wereld te worden geteisterd door grote natuurrampen met vaak catastrofale gevolgen voor het leven op aarde. Een verklaring hiervoor wordt gegeven door David Attenborough die beschrijft dat door menselijk handelen (industrie, transport, en manier van leven) een aantal drempelwaarden zijn overschreden die zijn vastgesteld om duurzaam en veilig te kunnen leven op aarde. Een van deze drempelwaarden is de hoeveelheid CO_2 die in de atmosfeer terecht komt, waardoor het broeikaseffect versterkt wordt. Als we leven op de planeet in haar huidige vorm en verscheidenheid in stand willen houden moet de CO_2-concentratie in de atmosfeer naar beneden.

De urgentie voor het probleem is wereldwijd onderkend. In 2015 hebben wereldleiders de Parijs Akkoorden getekend, waaraan 196 landen hebben getekend voor het terugdringen van broeikasgassen in de atmosfeer om uiteindelijk de opwarming van de atmosfeer te beperken tot maximaal 2 graden Celsius, maar onder gunstige omstandigheden tot 1.5 graden Celsius (UNFCCC, 2015). Dit akkoord verplicht landen en sectoren (zoals de industrie, landbouw en transport) om harde maatregelen te nemen. In Nederland noemen we deze opgave ook wel de Energie Transitie. Het komt erop neer dat de hele infrastructuur van energievoorziening, warmtehuishouding, transport, industrie en landbouw voor een enorme opgave staan om de hoeveelheid CO_2 uit hun processen te halen. Het haven industrieel complex van Rotterdam speelt een cruciale rol om de energietransitie te realiseren. Er is veel kennis aanwezig over chemische processen gerelateerd aan verduurzaming en er is een recente havenvisie die dient als routekaart voor industrieën die draaien op fossiele brandstoffen om de transitie te maken naar hernieuwbare brandstoffen.

De doelstelling van dit profielwerkstuk is te onderzoeken hoe het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan kan worden verhoogd. In dit onderzoek kies ik bewust voor een alternatieve benadering van CO_2-opslag die gebaseerd is op de werking van natuurlijke processen van oceanische ecosystemen. Van nature neemt de oceaan al veel CO_2 op. Door de wisselwerking tussen oceanen en de atmosfeer vindt CO_2 een balans tussen de concentratie in de lucht en in het water. Dit natuurlijke proces wordt beïnvloed door waterstromingen aan de oppervlakte en in de diepten van de oceanen. Het natuurlijke proces van oceanen om CO2 op te nemen is niet oneindig. De stijging van de hoeveelheid CO_2 dat in de atmosfeer en oceaan aanwezig is, verandert de hele balans van de diffusie van CO_2. Naast de oceaanverzuring zorgt de stijgende CO_2-concentratie ook voor een stimulatie van het versterkte broeikaseffect, waardoor de oceaan opwarmt. Dit kan leiden tot onbalans in voedselketens. Veel organismen zijn namelijk erg gevoelig voor temperatuurverschillen. Ook leidt de warmere oceaan tot thermische expansie en smeltende ijskappen. Hierdoor stijgt de zeespiegel.

In dit verslag worden verschillende oplossingen beschreven die ervoor zouden kunnen zorgen dat de oceaan meer CO_2 opneemt. Deze zijn: waterplanten op grote schaal verbouwen, kunstmatige bemesting van fytoplankton, beschermen en herstellen van blauwe koolstof ecosystemen, de alkaliteit van de oceanen verbeteren en het aanleggen van CO_2 meren in de oceanen. Op basis van kennis uit de literatuur kunnen we concluderen dat de technieken en methoden die nu in ontwikkeling zijn ook nadelen hebben. Zo kan het duur zijn, praktisch moeilijk haalbaar zijn of negatieve (neven)effecten hebben op het milieu, zoals eutrofiëring.

Dit gaf aanleiding tot mijn eigen onderzoek. In mijn experiment is onderzocht of kalkwater samen met CO_2 ervoor zou kunnen zorgen dat het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan verhoogd kon worden zonder de balans te verstoren.

De onderzoeksvraag van het experiment is:

Zou het toevoegen van kalkwater aan oceaanwater het CO_2-absorberend vermogen kunnen verhogen?

Om deze vraag te beantwoorden heb ik een eigen experiment opgezet en uitgevoerd in samenwerking met mijn scheikunde docent en de Oefenfabriek van het STC Proces College in Brielle.

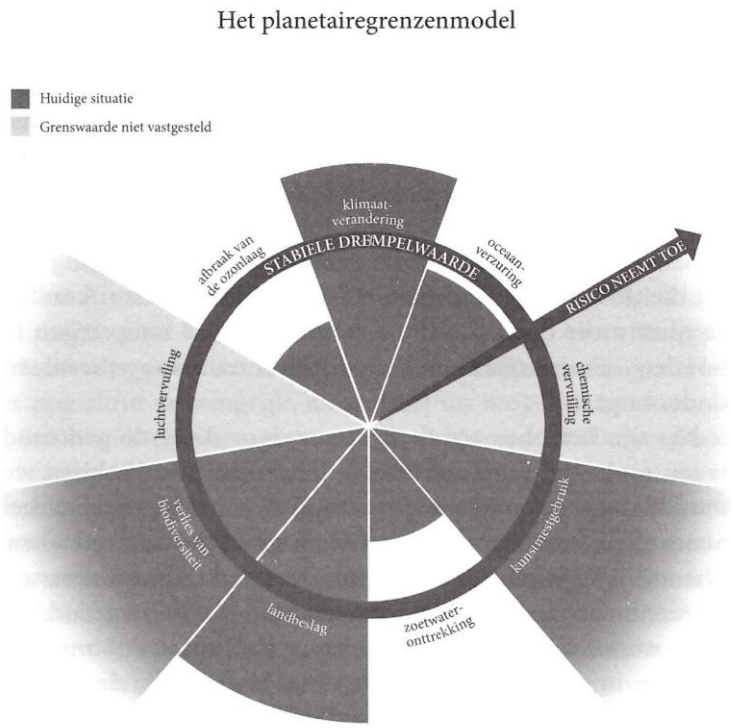
Uit de resultaten blijkt dat uit een bepaalde hoeveelheid CO_2 kalksteen is ontstaan. Als dit proces opgeschaald wordt, zal dus een grote hoeveelheid kalksteen ontstaan. Het toevoegen van kalkwater aan oceaanwater zal in theorie ervoor zorgen dat de CO_2 opgeslagen wordt in de vorm van calciumcarbonaat. Daardoor wordt er meer CO_2 in het oceaanwater opgenomen. Daarnaast kan de kalksteen gebruikt worden door verschillende oceaandieren. De reactie die ik heb gebruikt in het experiment komt dicht bij het natuurlijke proces van organismen in de oceaan zoals walvissen, koraal of schelpen CO2 omzetten. Zij gebruiken calciumcarbonaat als bouwstof voor hun botten of schalen. Als zij doodgaan, zinkt het geraamte naar de bodem van de oceaan. Er mag dus aangenomen worden dat het ontstaan van meer kalksteen en het absorberen van CO_2 door de toevoeging van kalkwater het leven in de oceaan stimuleert. De oceaan kan dus door verschillende technieken de oplossing bieden bij het verlagen van het versterkte broeikaseffect.

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding 6
1.1 Probleemstelling en onderzoeksvraag 8
1.2 Onderzoeksopzet 8
2. Vermogen van de oceaan voor absorberen van CO_2 9
2.1 De werking van diffusie van CO_2 in de oceaan 9
2.2 Invloed van waterstromingen op de CO_2 in de oceaan 10
2.3 Absorptie van CO_2 in de oceaan via de fotosynthese cyclus / de biologische pomp 11
3. De invloed van opname van CO_2 op de oceaan 13
3.1 De oceaanverzuring 13
3.2 Opwarming van de oceaan 16
4. Het verhogen van het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan 18
4.1 Het verbouwen van waterplanten op grote schaal 18
4.2 Kunstmatige bemesting van fytoplankton 19
4.3 Het beschermen en herstellen van blauwe koolstof-ecosystemen 20
4.4 De alkaliteit van de oceaan verbeteren 21
4.5 CO_2-meren in de oceaan 22
4.6 Conclusie 23
5. Experiment: toevoeging van CO_2 aan kalkwater 24
5.1 Opzet van het experiment 24
5.2 Hypothese 25
5.3 Materialen en Opstelling 25
5.4 Methode 26
5.5 Waarnemingen en resultaten 27
6. Conclusie en discussie 29
6.1 Probleem achtergrond 29
6.2 Antwoord op de onderzoeksvraag 30
6.3 Beperkingen van het onderzoek 30
Literatuurlijst 32
Bijlage 1: Foto's van het experiment 34

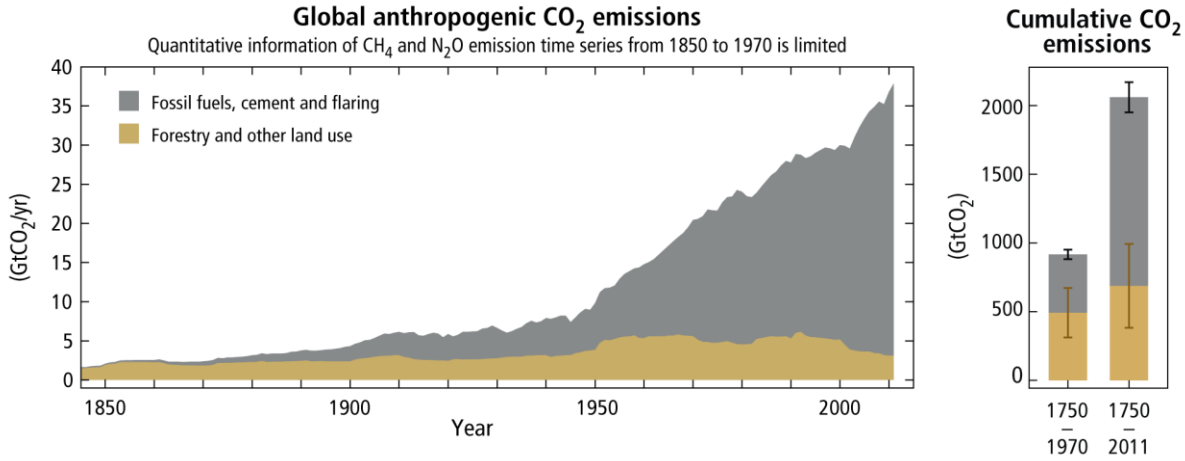
1. INLEIDING

De bosbranden in Australië, de droogte in Afrika, de overstromingen in Azië, de tornado's in Amerika en de smeltende ijskappen op Antarctica hebben één ding gemeen: het kan allemaal gerelateerd worden aan klimaatverandering. Met klimaatverandering wordt bedoeld dat de aarde steeds warmer wordt door de toename van broeikasgassen zoals CO_2, die voorkomen dat warmte van de zon kan ontsnappen naar de ruimte. Klimaatverandering is een grote crisis die steeds meer invloed krijgt op het dagelijks leven. In het boek 'A life on our planet' beschrijft David Attenborough dat de klimaatverandering op te splitsen is in negen kritische drempelwaarden. Als we binnen deze drempelwaarden blijven, dan leven we een duurzaam, veilig bestaan en kunnen we het systeem Aarde in stand houden. Overschrijden we deze drempelwaarden, dan leven we buiten de veilige zone, en brengen we schade toe aan het milieu met catastrofale gevolgen voor het leven op Aarde, inclusief onszelf.

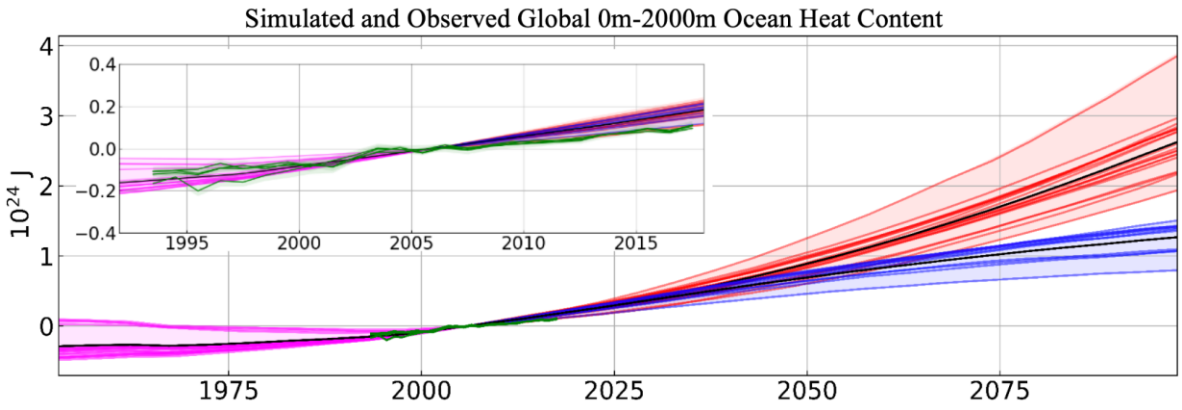


Afbeelding 1: Het planetaire grenzenmodel (Attenborough, 2020)

In afbeelding 1 is te zien dat de hoeveelheid broeikasgassen die klimaatverandering versterkt al ver over de kritische drempelwaarde zit. Het is daarom cruciaal dat de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer snel wordt gereduceerd. De oceaan speelt een belangrijke rol tegen deze luchtvervuiling van de aarde. Het neemt namelijk 93% van de extra warmte op afkomstig van het versterkte broeikaseffect en 30% van de CO_2 die de mens jaarlijks uitstoot uit de atmosfeer. Door de grote hoeveelheid fotosynthetiserende levensvormen in de oceaan, draagt de oceaan ook bij aan het verminderen van CO2 in de atmosfeer. Helaas is de grote opname van CO_2 door deze organismen in de oceaan niet genoeg geweest om de oplossing tegen het versterkte broeikaseffect te bieden. De enorme hoeveelheid CO_2 en warmte die de oceaan opneemt begint steeds meer invloed te krijgen op het oceaanleven, en indirect ook op ons. In afbeelding 2 en 3 worden grafieken weergegeven waarin de jaarlijkse wereldwijde relatie tussen de stijgende CO_2-uitstoot en de stijgende warmte inhoud van de oceaan te zien is.



Afbeelding 2: De jaarlijkse wereldwijde door de mens veroorzaakte uitstoot van koolstofdioxide (IPCC, 2014)



Afbeelding 3: de verandering in warmte-inhoud van de oceaan (IPCC, 2019)

Gelukkig blijkt uit onderzoek dat de oceaan een grote potentie heeft in de strijd tegen het versterkte broeikaseffect, maar dat wordt vooralsnog niet volledig benut (Rau, Enhancing the Ocean's Role in CO2Mitigation, 2007). De urgentie van het probleem rondom klimaatverandering is wereldwijd onderkend. In 2015 hebben wereldleiders de Parijs Akkoorden getekend, waaraan 196 landen hebben getekend voor het terugdringen van broeikasgassen in de atmosfeer om uiteindelijk de opwarming van de atmosfeer te beperken tot maximaal 2 graden Celsius, maar idealiter tot 1.5 graden Celsius (UNFCCC, 2015). Dit akkoord is op 1 januari 2020 ingegaan en verplicht landen en sectoren (zoals de industrie en transport) om harde maatregelen te nemen. In Nederland noemen we deze opgave ook wel de Energie Transitie. Het komt erop neer dat de hele infrastructuur van energievoorziening, warmtehuishouding, transport, industrie en landbouw voor een enorme opgave staan om de CO_2 uitstoot van hun processen te verminderen

Het haven industrieel complex van Rotterdam speelt een cruciale rol om de energietransitie te realiseren. Er is veel kennis aanwezig over chemische processen rondom verduurzaming en er is een recente havenvisie die dient als routekaart voor de transitie van industrieën die draaien op fossiele brandstoffen naar hernieuwbare brandstoffen.

1.1 PROBLEEMSTELLING EN ONDERZOEKSVRAAG

Het probleem is dat er momenteel door menselijk toedoen te veel CO_2 vrijkomt in de atmosfeer. Hierdoor blijft het versterkte broeikaseffect toenemen, wat negatieve gevolgen heeft voor de natuur. Als we leven op de planeet in stand willen houden zal de CO_2-concentratie in de atmosfeer naar beneden moeten. In dit onderzoek verkennen we de onbenutte potentie van de oceaan in de strijd tegen klimaatverandering.

De doelstelling van dit profielwerkstuk is te onderzoeken hoe het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan kan worden verhoogd. Hiermee is de centrale onderzoeksvraag:

Hoe kan de oceaan oplossingen bieden bij het verminderen van het versterkte broeikaseffect?

Om hier antwoord op te krijgen, moeten de volgende deelvragen worden beantwoord:

1. Hoe absorbeert de oceaan CO_2?
2. Wat voor invloed heeft de opname van CO_2 op de oceaan?
3. Hoe kan het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan worden verhoogd?

Deze vragen worden in achtereenvolgende hoofdstukken behandeld.

1.2 ONDERZOEKSOPZET

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden, is eerst theoretische kennis nodig. In het eerste hoofdstuk wordt gekeken naar de manieren waarop de oceaan al uit zichzelf CO_2 opneemt. In het tweede hoofdstuk wordt vervolgens gekeken naar wat de toenemende hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer doet met de oceaan. Tot slot worden verschillende oplossingen beschreven die ervoor zouden kunnen zorgen dat de oceaan meer CO_2 opneemt. Daarna wordt een experiment beschreven waarbij is onderzocht of het mogelijk is om CO_2 en kalkwater om te zetten in calciumcarbonaat, wat een nieuwe oplossing zou zijn om het CO_2 absorberend vermogen van de oceaan te verhogen, (IPCC, 2014).

2. VERMOGEN VAN DE OCEAAN VOOR ABSORBEREN VAN CO_2

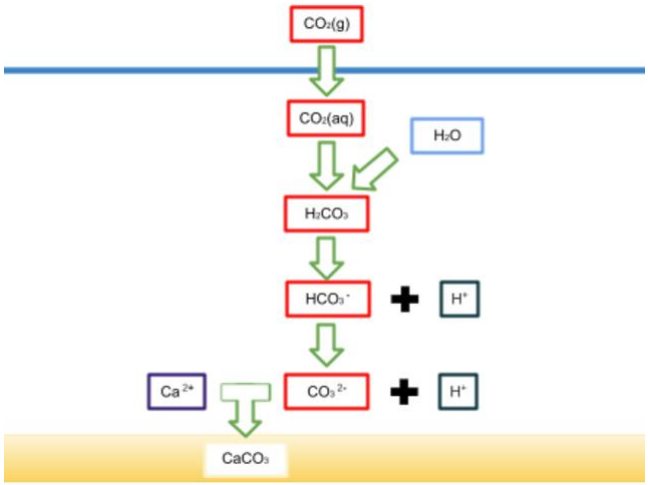
Koolstofdioxide (CO_2) is een gas dat in de atmosfeer aanwezig is. Door menselijke activiteiten is de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer de laatste 200 jaar sterk toegenomen, met name door het verbranden van fossiele brandstoffen (bijvoorbeeld aardolie en aardgas). Metingen van de lucht in ijskernen tonen aan dat in de afgelopen 800.000 jaar de concentratie CO_2 tussen de 170 en 300 ppm is gebleven. Sinds de industriële revolutie, Het moment waarop de mensheid meer CO_2 begon uit te stoten en uiteindelijk overstapte op massaal gebruik van fossiele brandstoffen, is deze concentratie boven dit gemiddelde uit gaan stijgen. Op dit moment ligt de concentratie zelfs gemiddeld op 412 ppm (Royal Society, US National Academy of Sciences, 2020). De oceaan heeft veel invloed op de CO_2 in de atmosfeer. Jaarlijks absorbeert de oceaan 30% van de CO_2 die de mens uitstoot (IPCC, 2019). Dit gebeurt op verschillende manieren: CO_2 kan oplossen in oceaanwater door middel van diffusie, opgelost in water getransporteerd worden door waterstromen of vastgelegd worden in de koolstofcyclus door middel van fotosynthese (Rau, CO Mitigation via Capture and 2 Chemical Conversion in Seawater, 2010). In de volgende paragrafen worden deze verschillende manieren verder toegelicht.

2.1 DE WERKING VAN DIFFUSIE VAN CO_2 IN DE OCEAAN

De diffusie van CO_2 in het water betreft een cyclus. Doordat CO_2 gemakkelijk kan oplossen in water, bestaat er een bepaalde balans in de CO_2-concentratie tussen de oceaan en de atmosfeer. Er geldt:

$$CO_2\,(g) \rightleftharpoons CO_2\,(aq)$$ (Jean-Pierre Gattuso, 2011)

CO_2 kan dus vanuit de atmosfeer gemakkelijk in de oceaan terecht komen door middel van diffusie. Wanneer de CO_2 in de oceaan komt, vindt er een chemische reactie plaats. Koolstofdioxide (CO_2) reageert met watermoleculen (H_2O) en er ontstaat diwaterstofcarbonaat (H_2CO_3). Diwaterstofcarbonaat kan vervolgens een H^+ afstaan, waardoor er waterstofcarbonaat (HCO_3^-) ontstaat. Waterstofcarbonaat kan nog een H^+ afstaan, en verandert dan in carbonaat (CO_3^{2-}). Het carbonaat kan reageren met calcium (Ca^{2+}), waardoor calciumcarbonaat ($CaCO_3$) ontstaat, zie onderstaande afbeelding 4.



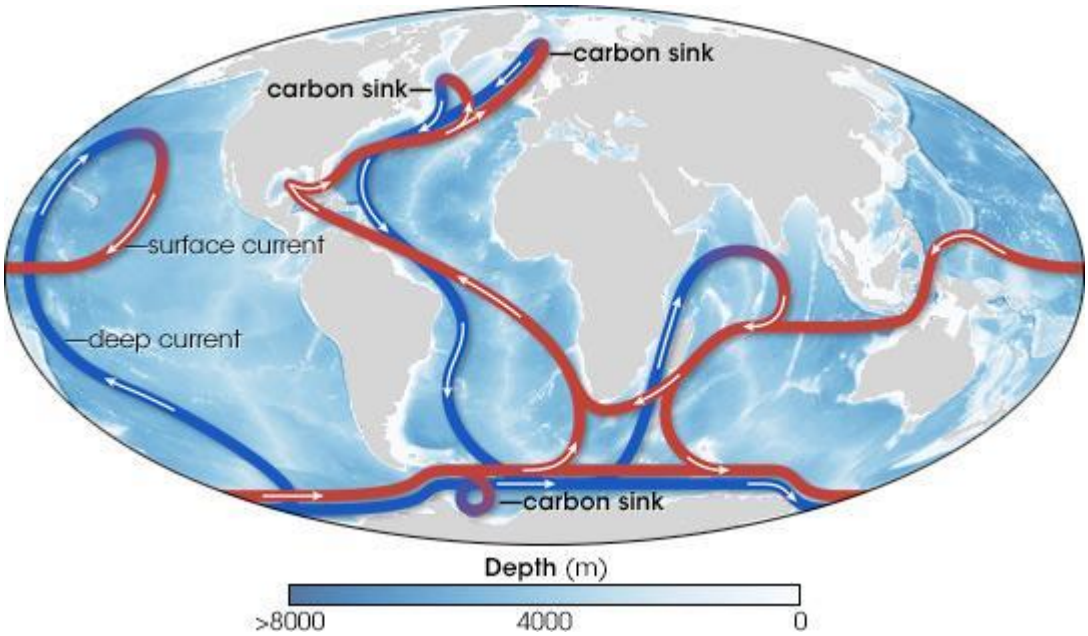
$$CO_2\,(aq) + H_2O\,(l) \rightleftharpoons H_2CO_3\,(aq) \rightleftharpoons HCO_3^-\,(aq) + H^+\,(aq)$$
$$HCO_3^-\,(aq) \rightleftharpoons CO_3^{2-}\,(aq) + H^+\,(aq)$$
$$CO_3^{2-}\,(aq) + Ca^{2+}\,(aq) \rightarrow CaCO_3\,(s)$$

Afbeelding 4: De diffusie van CO_2 in de oceaan

Omdat dit alles een cyclus is, kan calciumcarbonaat weer reageren tot calcium en carbonaat. Zo kan de hele cyclus worden omgedraaid, waardoor uiteindelijk weer koolstofdioxide ontstaat. Door de opslag van CO_2 in de vorm van $CaCO_3$ kan het heel lang duren voordat de CO_2 weer terug de atmosfeer in komt. Dit proces kan eeuwen duren. Daarom wordt het gezien als een manier om CO_2 op te slaan (Rau, CO Mitigation via Capture and 2 Chemical Conversion in Seawater, 2010).

2.2 INVLOED VAN WATERSTROMINGEN OP DE CO_2 IN DE OCEAAN

Een tweede CO_2 cyclus die in de oceaan plaatsvindt heeft te maken met de stromingen in de oceaan. De oceanen zijn met elkaar verbonden door diepe stromingen en oppervlaktestromingen. De CO_2 die opgelost is in het oceaanwater wordt door deze oppervlaktestromingen meegenomen. Een belangrijke factor in deze cyclus is de temperatuur van het water. Als het water koud is, daalt CO_2 naar de diepe wateren van de oceaan. Wanneer het water dan warmer wordt, gaat de CO_2 richting het wateroppervlak en krijgt het weer de kans om terug de atmosfeer in te gaan. In de onderstaande afbeelding wordt dit uitgetekend op onze aarde. De CO_2 zinkt bij de polen naar de diepte van de oceaan. Bij de evenaar, waar het water warmer is, krijgt de CO_2 de kans om weer terug te komen naar de oppervlakte van de oceaan.



Afbeelding 5: De invloed van waterstromingen op de CO_2 in de oceaan (NASA earth observatory, 2008)

Een belangrijk punt in deze cyclus zit in de diepte van de oceaan. Als de CO_2 in de diepte van de oceanen terecht komt, kan het eeuwen duren voordat de CO_2 in de diepe stromingen weer aan het oppervlak van de oceaan komt en weer vrij kan komen in de atmosfeer (IPCC, 2001).

2.3 ABSORPTIE VAN CO_2 IN DE OCEAAN VIA DE FOTOSYNTHESE CYCLUS / DE BIOLOGISCHE POMP

De fotosynthese cyclus in de oceaan is een cyclus met veel invloed op de CO_2-concentratie in de atmosfeer. In de oceaan is een enorme hoeveelheid leven te vinden. De groep organismen die een hele grote hoeveelheid CO2 opneemt is het Fytoplankton. Fytoplankton is een verzamelnaam voor kleine plantaardige organismen in het water, die CO2 met behulp van zonlicht om kunnen zetten in voedsel via fotosynthese. Fytoplankton neemt jaarlijks ongeveer 10 gigaton (= 10 000 000 000 000 kg) CO_2 op (Rebecca Lindsey, 2010). Daarnaast is fytoplankton verantwoordelijk voor 50 procent van de jaarlijkse zuurstofproductie op aarde. Dit terwijl de totale biomassa van al het fytoplankton honderd keer minder is dan de biomassa alle landplanten. Dit komt omdat planten op het land een groot deel van de energie uit de fotosynthese nodig hebben om een sterke structuur te behouden. Denk daarbij aan wortels, stammen en bladeren. Omdat fytoplankton in de oceaan leeft, en dus geen last heeft van zwaartekracht, hoeft het geen sterke structuur te behouden. Een ander voordeel voor het fytoplankton is dat het omringt is met de benodigde voedingsstoffen. In een individuele cel liggen alle benodigde onderdelen om deze voedingsstoffen op te nemen, en daardoor te doen aan fotosynthese, te groeien en te reproduceren op een enorm efficiënte manier. Om te groeien doet fytoplankton dus aan fotosynthese. Bij fotosynthese gaat water en koolstofdioxide een cel in. Als eindproducten ontstaan zuurstof en glucose (Kranendonk, 2013).

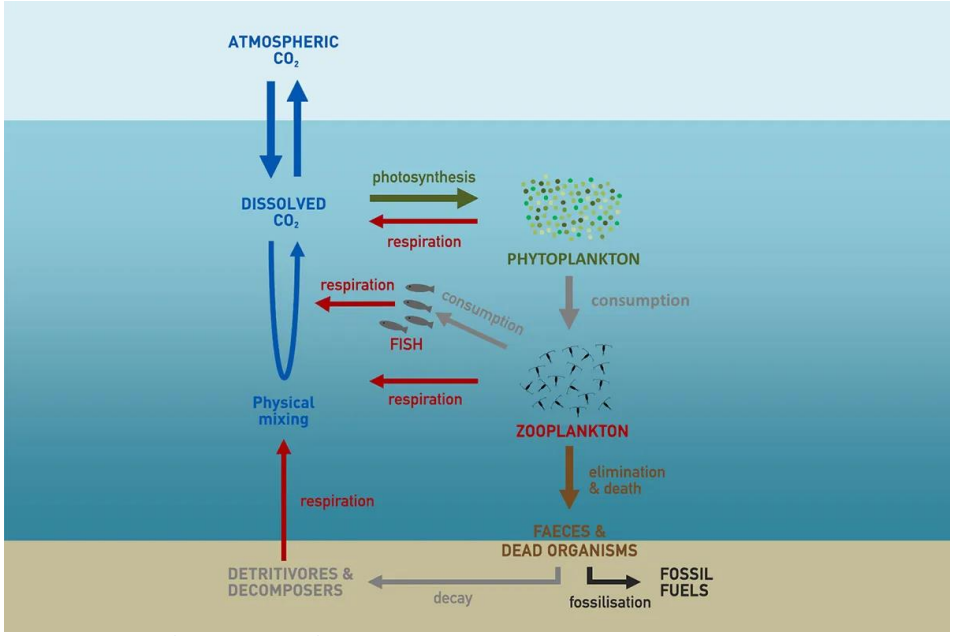
$$6CO_2\ (g) + 6H_2O\ (l) + \text{Energie} \rightarrow 6O_2\ (g) + C_6H_{12}O_6\ (s)$$

Er wordt dus koolstofdioxide gebruikt om voedingstoffen te maken. Op deze manier neemt al het fytoplankton in de oceaan bij elkaar meer dan tien keer zo veel koolstofdioxide op dan dat de mens per jaar uitstoot door het verbranden van fossiele brandstoffen (Riebesell, 2004).

De voedselketen van de oceaan begint bij het fytoplankton. Fytoplankton is daarom een belangrijke voedselbron voor veel andere organismen in het water, omdat het zo snel groeit en reproduceert. Hierdoor belandt de CO_2 in de voedselketen en komt het terecht in andere organismen. Bij het overlijden van deze dieren en door uitwerpselen, zinkt de CO_2 naar de bodem van de oceaan. Dit CO_2-rijk organisch materiaal kan in de diepte van de oceaan voor een hele lange tijd opgeslagen blijven. Dit fenomeen heet ‘marine snow’ (KIØRBOE, 2001). Natuurlijk ontsnapt er CO_2 uit de voedselketen. De oceaan dieren maken namelijk, net als wij mensen, energie vrij door middel van verbranding.

$$6O_2\ (g) + C_6H_{12}O_6\ (s) \rightarrow 6CO_2\ (g) + 6H_2O\ (l) + \text{Energie}$$

Zoals in bovenstaande reactievergelijking te zien is, komt bij het uitademen veel CO_2 weer terug in de atmosfeer. Ook wordt veel organisch materiaal afgebroken door bacteriën, waardoor het weer terug veranderd in CO_2. Sommige organismen gebruiken CO_2 indirect voor het maken van uitwendige kalkskeletten. Ze gebruiken namelijk calciumcarbonaat ($CaCO_3$), wat is ontstaan door de diffusie van CO_2 in de oceaan. Ook in deze vorm van deze kalkskeletten kan CO_2 zinken naar de bodem van de oceaan, en zo opgeslagen blijven voor eeuwen.

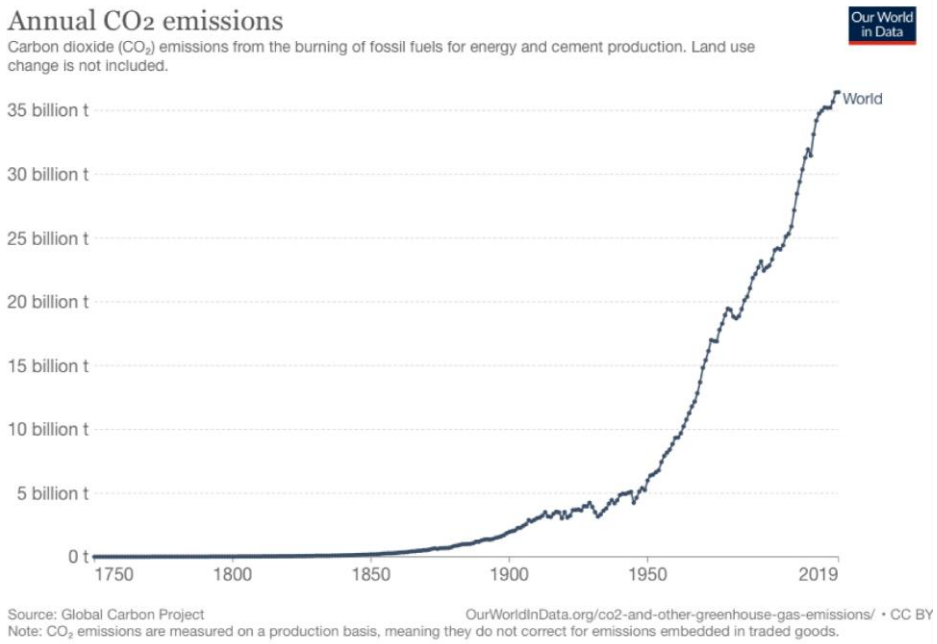


Afbeelding 6: De fotosynthesecyclus in de oceaan (Encounter Edu, z.d.)

De verplaatsing van CO_2 van de atmosfeer naar de diepte van de oceaan via organismen wordt ook wel de biologische pomp genoemd. De CO_2 verplaatst zich via de voedselketen richting de bodem van de oceaan, waar het voor een lange periode opgeslagen kan blijven.
(Riebesell, 2004; Lindsey 2010; Falkowski, 2012)

3. DE INVLOED VAN OPNAME VAN CO_2 OP DE OCEAAN

De oceaan bedekt 71% van de aarde. Daarnaast produceert fytoplankton in de oceaan 50% van de totale zuurstofproductie. Ook zorgt de oceaan voor voedsel in inkomsten voor miljarden mensen. Het is dus onvermijdelijk dat de mens afhankelijk blijft van de oceaan. Daarom verdient de oceaan meer zorg dan dat het nu krijgt van de mens. In afbeelding 7 is af te lezen dat in 2019 wereldwijd meer dan 36 miljard ton CO_2 is uitgestoten. Een kwart hiervan wordt opgenomen in de oceaan. Uit een kleine rekensom komt uit dat de oceaan dus ruim 9 miljard ton CO_2 heeft geabsorbeerd in 1 jaar.



Afbeelding 7: De jaarlijkse CO_2-uitstoot door de verbranding van fossiele brandstoffen (Hannah Ritchie, 2020)

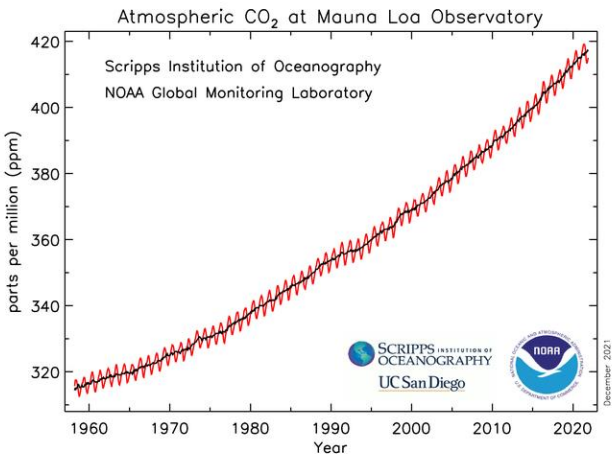
Maar wat doet de te hoge CO_2-concentratie met de oceaan? In de onderstaande paragrafen worden deze gevaren verder omschreven, zoals de oceaanverzuring en de opwarming van de oceaan (National Geographic Society , 2019).

3.1 DE OCEAANVERZURING

De oceaan neemt CO_2 op via diffusie zodat de balans van de concentratie CO_2 tussen de atmosfeer en de oceaan gelijk blijft. CO_2 en H_2O (water) kunnen samen reageren. Zoals eerder uitgelegd, ontstaat vervolgens de volgende reactieketen:

$$CO_2\,(aq) + H_2O\,(l) \rightleftharpoons H_2CO_3\,(aq) \rightleftharpoons HCO_3^-\,(aq) + H^+\,(aq)$$
$$HCO_3^-\,(aq) \rightleftharpoons CO_3^{2-}\,(aq) + H^+\,(aq)$$
$$CO_3^{2-}\,(aq) + Ca^{2+}\,(aq) \rightarrow CaCO_3\,(s)$$

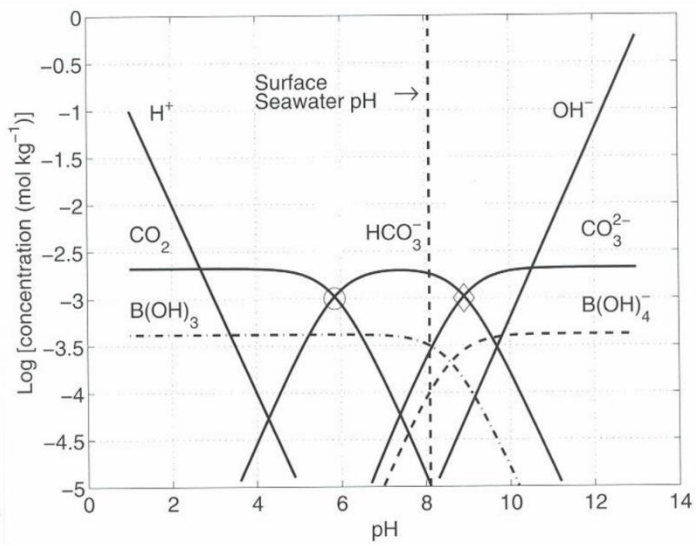
Opvallend is dat, bij de vorming van calciumcarbonaat, er een H^+ (waterstofion) vrijkomt. Deze waterstofionen zorgen voor het grote probleem. Een stijging van de concentratie waterstofionen, zorgt voor een afname van de pH-waarde en dus voor verzuring van het water in de oceaan. Oftewel, een toename van CO_2 zorgt indirect dus voor een afname van pH in de oceaan. Dit is ook waargenomen in een onderzoek van Richard Feely (2021), zie onderstaande afbeelding 8:



Afbeelding 8: De CO_2 -concentratie in de atmosfeer (Richard Feely, 2021)

De definitie van pH is het negatieve logaritme van de waterstofconcentratie (-log[H+]). Dat betekent dat als de concentratie van de waterstofionen toeneemt, dat de pH-waarde daalt. In 1751, nog voor de industriële revolutie, was de pH-waarde van de oceaan nog 8,25. na deze industriële revolutie, in 1996, was de pH-waarde al gezakt naar 8,14 (Guinottea, 2008). De 0.11 verschil lijkt heel klein. Maar de pH-waarde schaalt logaritmisch. Als dit in verband wordt gelegd met die afname van 0.11, is te zien dat de oceaan sinds de industriële revolutie een stijging gehad heeft van 30% in de concentratie waterstofionen. De voorspellingen zijn dat in het jaar 2100 de pH-waarde zal dalen tot maar liefst 7,80. Dat is een verandering van ongeveer 170% (IGBP, IOC, SCOR, 2013). Deze verandering in pH kan grote gevolgen hebben voor het oceaanleven.

In onderstaande afbeelding 9 is te zien dat de pH-waarde gevolgen heeft op de concentratie koolstofdioxide (CO_2), waterstofcarbonaat (HCO_3^-) en carbonaat (CO_3^{2-}) in zeewater. Wanneer er meer CO_2 in de oceaan komt, zal de pH-waarde dalen. Dit betekent dat de carbonaat-concentratie zal gaan dalen en de hoeveelheid waterstofcarbonaat zal gaan toenemen.

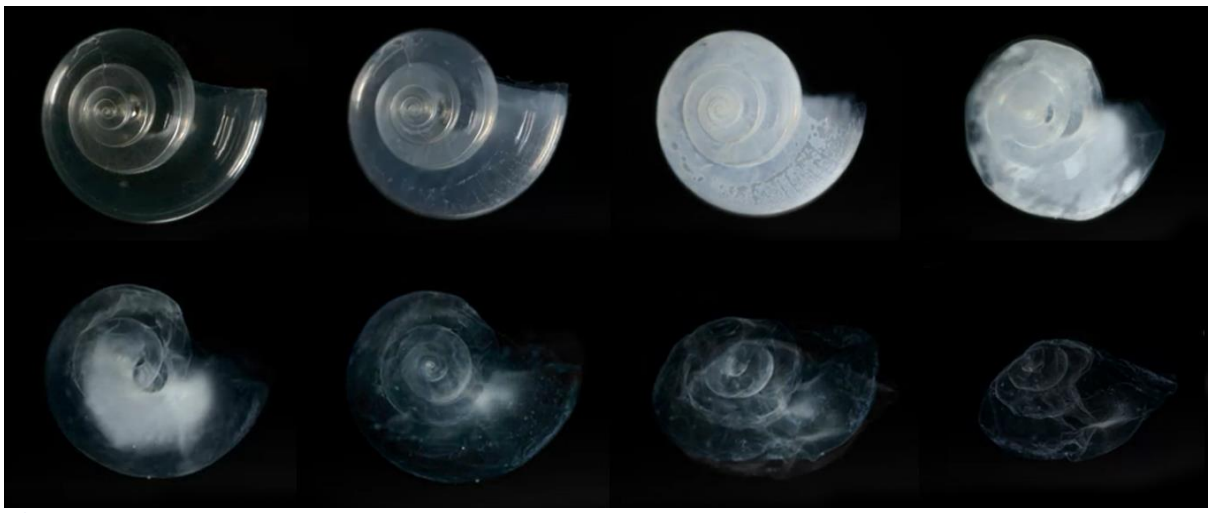


Afbeelding 9: Een Bjerrum-grafiek van het carbonaatsysteem (R.E. Zeebe, 2001)

Dit proces heeft een negatief effect op het oceaanleven. Carbonaat kan binden met calciumionen, waaruit calciumcarbonaat ontstaan. Calciumcarbonaat mineralen zijn de bouwstenen voor de kalkskeletten van veel oceaandieren. Als de hoeveelheid calciumcarbonaat gaat afnemen, betekent dit dus dat deze dieren moeite gaan hebben met het produceren van hun kalkskeletten. Daartoe behoren planktonische kalkvormers, koralen en weekdieren, stekelhuidigen en schaaldieren. Uit onderzoek is gebleken dat bij veel kalkvormende organismen de overleving, groei, ontwikkeling en talrijkheid afnemen door de toenemende concentratie CO (Wittmann, 2013). Koraal wordt ook hard getroffen door de oceaanverzuring. Koraal gebruikt als bouwstof calciumcarbonaat. Als deze stof ontbreekt, kan koraal simpelweg niet meer groeien. Al deze organismen zijn een groot onderdeel van het voedselweb in de oceaan. Minder van deze organismen betekent dus een tekort aan voedsel, dus gaan grote organismen ook moeite hebben met overleven.

Verschillende soorten plankton zoals foraminiferen en coccolithoforen worden misschien wel het meest beïnvloed door de veranderingen, omdat ze hun schelpen van calciumcarbonaat maken. Ze hebben naast het dienen als voedsel ook andere eigenschappen. Zo zijn deze plankton bijvoorbeeld heel belangrijk in de ecosystemen als fytoplankton producenten. Daarnaast produceren coccolithoforen dimethylsulfide (C_2H_6S) die helpt bij het produceren van wolken (Malin, 2004). Wanneer er minder coccolithoforen zijn, is er minder wolkvorming. Wolken helpen de aarde tegen opwarmen door zonlicht te weerkaatsen. Indirect zorgt de afname van coccolithoforen dus niet alleen voor minder voedsel, maar ook voor een warmere aardbol.

In afbeelding 10 is te zien wat er gebeurt met een Pteropoda schelp wanneer het zich bevindt in een omgeving met de verwachte pH-waarde (7.80) van de oceaan in 2100.

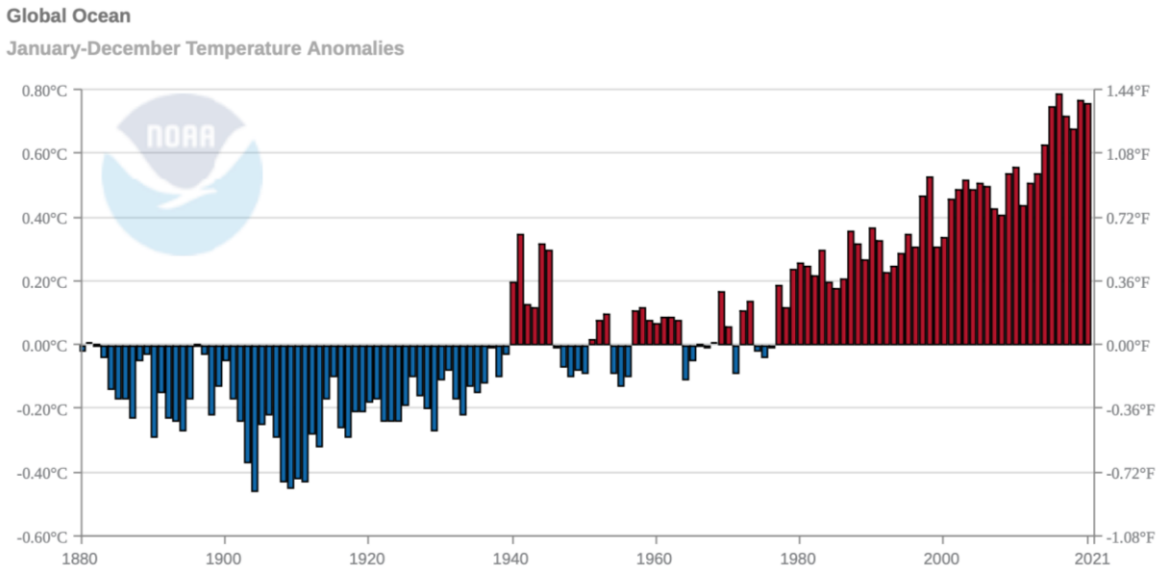


Afbeelding 10: Pteropodschelp opgelost in zeewater aangepast aan de voorspelde ph-verandering in de oceaan voor het jaar 2100 (Union of Concerned Scientists, 2019)

Er valt op te merken dat de schelp bijna helemaal oplost. Over tachtig jaar zal dit overal op onze planeet plaatsvinden. Dit zou betekenen dat bijna een gehele tak van de voedselketen in elkaar zakt. Niet alleen oceaan dieren zoals vissen of zelfs walvissen gaan hier last van hebben, ook miljarden mensen die leven op het voedsel van de oceaan zullen moeilijker aan eten kunnen komen. (Andersen, Ocean Acidification, 2016) (IGBP, IOC, SCOR, 2013) (Warneck, 2003)

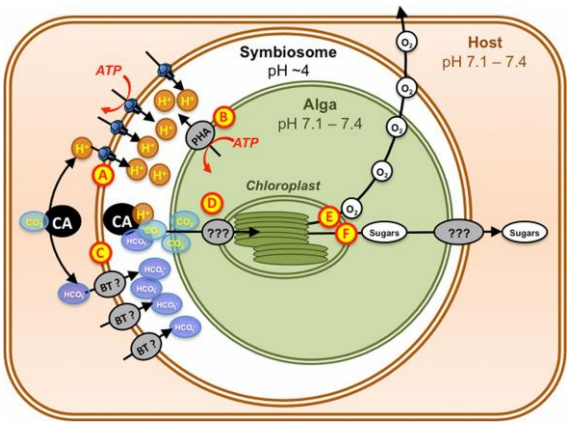
3.2 OPWARMING VAN DE OCEAAN

Een ander groot probleem dat voor een groot deel veroorzaakt wordt door de toenemende CO_2-concentratie is de opwarming van de oceaan. De oceaan absorbeert grote hoeveelheden warmte als gevolg van de verhoogde concentratie broeikasgassen in de atmosfeer. De oceaan heeft sinds 1970 meer dan 93% van de overtollige warmte van broeikasgasemissies geabsorbeerd. Hierdoor stijgt de temperatuur in de oceaan. Uit afbeelding 11 en 12 blijkt dat de gemiddelde temperatuur van het zeeoppervlak in de afgelopen 100 jaar met ongeveer 0,13°C per decennium is gestegen.



Afbeelding 11: De jaarlijkse temperatuurverschillen in de oceaan (NOAA, 2021)

De stijging van de temperatuur aan het oceaanoppervlak heeft grote effecten op het oceaanleven. Koraal wordt heel hard getroffen door de warmere oceaan. Koraal krijgt 90% van de energie uit een alg. Deze alg zit in de cellen van het koraal. Zonder deze algen zou een koraal een heterotroof zijn. Het zou net zoals elk ander dier alleen energie halen uit andere organismen. Maar omdat deze algen in het koraal gaat zitten, kan fotosynthese plaatsvinden binnen de koraal cellen en deze voorzien van voeding, zie afbeelding 12.



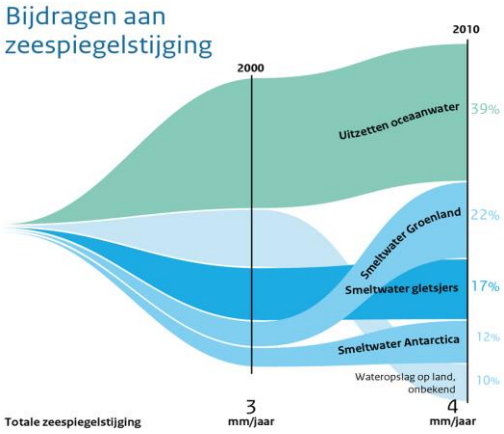
Afbeelding 12: Fotosynthese in de cellen van koraal (Katie L. Barott, 2015)

Als de temperatuur stijgt, werkt een deel van de fotosynthese in de algen niet meer. Hierdoor is de functionaliteit van de alg verloren, en verliest koraal dus 90% van de energietoevoer. Dit wordt koraalverbleking genoemd. Wanneer koraal verbleekt, is de ware structuur en kleur van koraal te zien, zie afbeelding 13. De algen doen het koraal lijken als een zee plant, maar in werkelijkheid bestaat het koraal zelf voornamelijk uit calciumcarbonaat-skeletten.

Afbeelding 13: Koralen zijn wit geworden door koraalverbleking (Mathiesen, 2017)

Niet alleen koraal, maar ook andere organismen hebben last van de temperatuurstijgingen. Dit is erg afhankelijk van hoe dichtbij ze bij hun thermische tolerantie leven. Sommige organismen, zoals koraal of sommige plankton-larven leven erg dicht bij de maximale warmte dat ze aan kunnen. Ze zijn daarom dus gevoeliger voor temperatuurstijgingen. Ook de tijd van het jaar waarin gepaard wordt gaat bij sommige dieren veranderen. Bijvoorbeeld bij het nonnetje, een weekdier, vindt door de opwarming van de oceaan de paartijd eerder plaats. De bloeitijd van fytoplankton, de voedselbron voor het nonnetje, blijft wel hetzelfde. Hierdoor ontstaat de verkeerde verhouding tussen de twee pieken en ontstaat een voedseltekort voor de jonge nonnetjes (Philippart et al., 2003). Deze kleine onregelmatigheden kunnen grote gevolgen hebben voor de hele voedselketen in de oceaan.

Naast de directe invloeden op het oceaanleven is er nog een ander groot probleem. Doordat de oceaan warmer wordt, gaat het oceaanwater uitzetten. Dit wordt thermische expansie genoemd. Oceanen absorberen een grote hoeveelheid warmte, waardoor het zeewater warmer wordt. Warmer zeewater heeft een groter volume dan koud zeewater. Hierdoor krijgt de oceaan een groter volume en zal het waterpeil stijgen. Ook het smelten van landijs heeft een grote invloed op het stijgende waterpeil. Onder landijs worden gletsjers en al de ijskappen op Antarctica en Groenland gerekend.



Afbeelding 14: De invloed van verschillende smeltende ijskappen op de zeespiegel (Bars, 2019)

Het ijs dat op bijvoorbeeld de noordpool ligt is zeeijs. Het smeltwater van zeeijs vervangt het verplaatste water. Daarom zal het geen effect hebben op het waterpeil (wet van Archimedes). In afbeelding 14 is de verhouding tussen de verschillende smeltende ijskappen te zien.

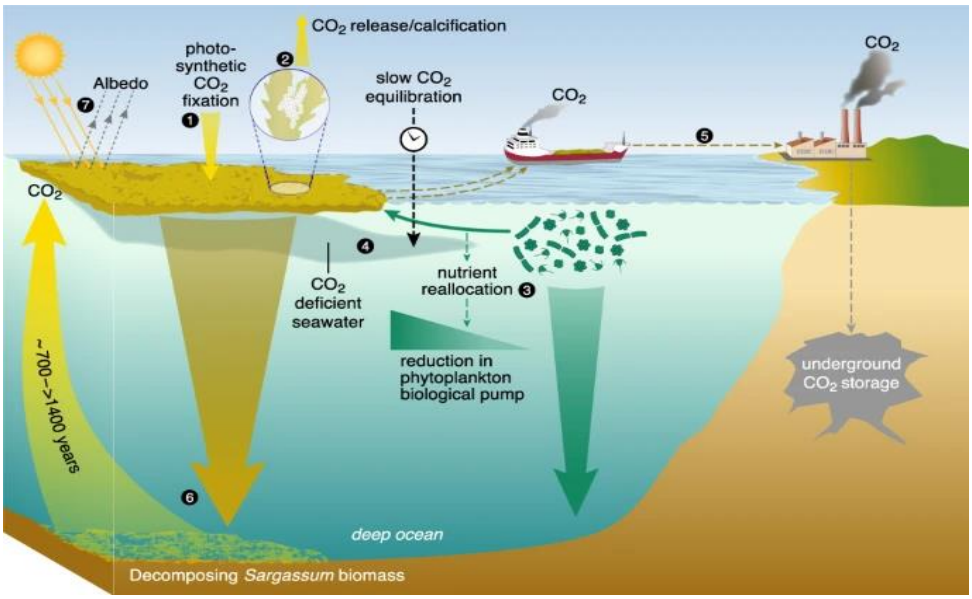
In de twintigste eeuw, van 1902 tot 2010, is de zeespiegel gemiddeld 12 tot 21 centimeter gestegen. Terwijl in 2400 jaar de verschillen in het waterpeil per eeuw niet meer waren dan 9 centimeter (SROCC, (2019)). Deze stijging in de zeespiegel neemt alleen nog maar verder toe. (Philippart, 2003; Harley, 2006; IPCC 2013, 2019; Andersen, 2016; IUCN, 2017; Borunda, 2019)

4. HET VERHOGEN VAN HET CO_2-ABSORBEREND VERMOGEN VAN DE OCEAAN

In de vorige hoofdstukken is beschreven op welke manieren de oceaan op een natuurlijke manier CO_2 absorbeert. Ook zijn de problemen waarmee de oceaan te maken krijgt door de stijgende CO_2-concentratie aangekaart. Het is nu dus duidelijk waarom de CO_2-concentratie in de atmosfeer verlaagd moet worden. De oceaan kan hier heel goed mee helpen. Er wordt enorm veel onderzoek gedaan naar nieuwe technologieën die kunnen helpen met het verlagen van de CO_2-concentratie in de atmosfeer en de oceaan. Hieronder worden een aantal technologieën benoemd waarvan al duidelijk is dat het kan helpen zonder dat het negatieve invloeden heeft op de oceaan. Al de volgende opties moeten worden vergeleken met elkaar op de volgende factoren: 1) doeltreffendheid, 2) effect op het milieu, 3) kosten. Op basis hiervan kunnen we bepalen welke technologie het meest effectief zou kunnen zijn.

4.1 HET VERBOUWEN VAN WATERPLANTEN OP GROTE SCHAAL

Het verbouwen van waterplanten op grote schaal zorgt ervoor dat meer CO_2 opgeslagen wordt in de vorm van biomassa. Daarnaast zullen op de plekken waar deze grote waterplant boerderijen liggen veel meer zuurstof in de oceaan komen, wat de omliggende ecosystemen stimuleert. Naast de omzetting van CO_2 via de fotosynthese cyclus, kunnen de waterplanten ook worden afgezonken of opgesloten, waardoor de CO_2 voor enkele eeuwen niet meer via de natuurlijke cyclus terug de atmosfeer in kan.

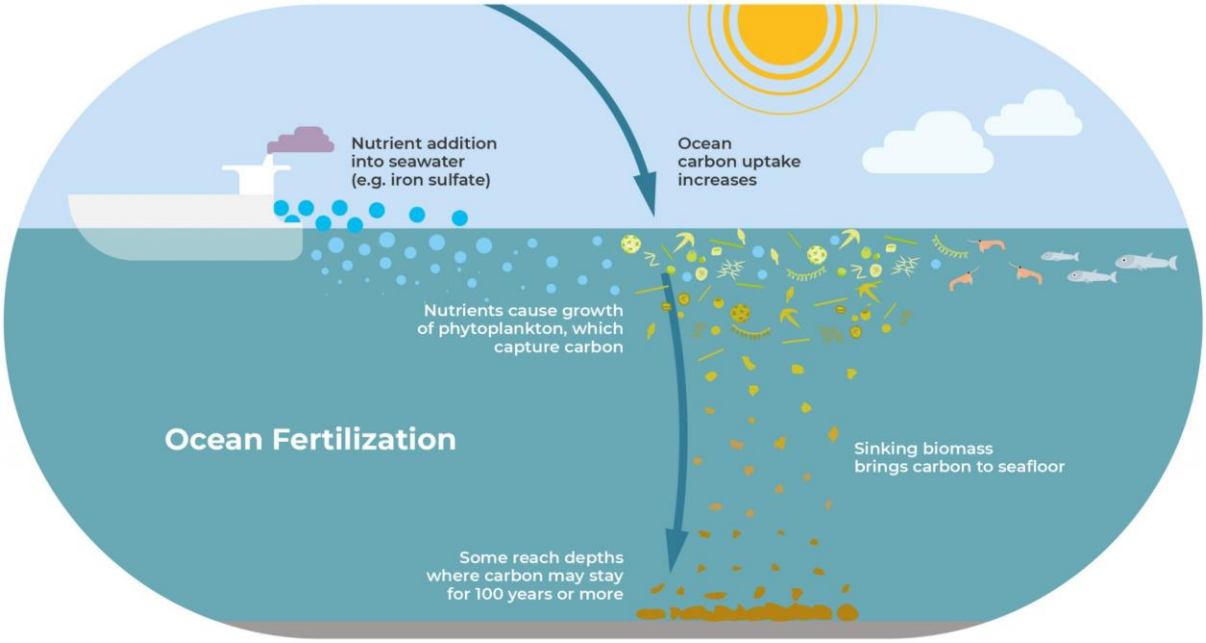


Afbeelding 15: Het verbouwen van waterplanten op grote schaal (Lennart T. Bach, 2021)

Deze techniek om CO_2 op te slaan is makkelijk in praktijk toe te passen, omdat het veel positieve invloeden heeft. Naast het positieve effect op de klimaatverandering en op de nabije ecosystemen, hebben waterplant boerderijen ook een positief effect op de steden en dorpen die in de buurt liggen, in de vorm van werkgelegenheid. Het is relatief goedkoop om deze techniek toe te passen, omdat er ook winst uit de behalen is. Naast het laten afzinken van de waterplanten, kan een klein deel namelijk verkocht worden. De boerderijen zorgen voor meer visvangst en meer banen. Hoewel het effect op de klimaatverandering niet groot zal zijn, kan deze techniek wel zorgen voor een aanzienlijke impuls voor de lokale economie. (Duarte Carlos, 2017; Bach, 2021)

4.2 KUNSTMATIGE BEMESTING VAN FYTOPLANKTON

De verplaatsing van CO_2 naar de diepe oceaan of in de sedimentlagen van de oceaan kan worden gestimuleerd door kunstmatige bemesting van fytoplankton, zie onderstaande afbeelding 16.



Afbeelding 16: Kunstmatige bemesting van de oceaan (OceanNETs, z.d.)

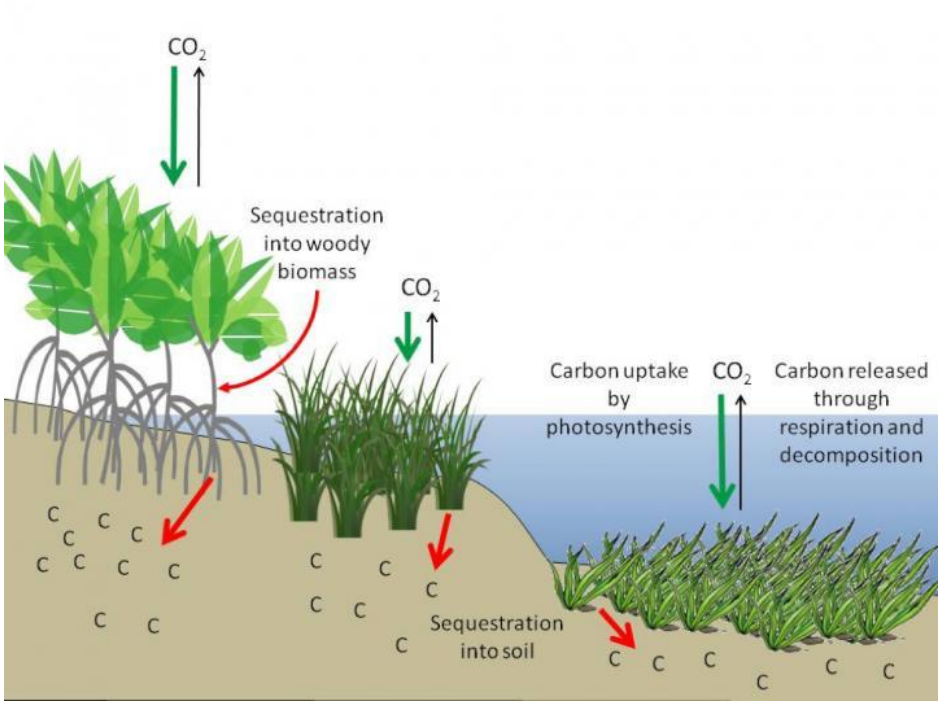
Fytoplankton heeft een enorm aandeel in de opname van CO_2 uit de atmosfeer. De productie van fytoplankton wordt echter beperkt door voedingsstoffen zoals ijzer. Als ijzer kunstmatig wordt toegevoegd aan de oceaan zal de productie van fytoplankton, en daarbij de opslag van CO_2 in biomassa, gestimuleerd worden (Maroto-Valer, 2010).

Het kunstmatig bemesten van fytoplankton heeft ook een paar nadelen. Zo kan de bemesting leiden tot eutrofiëring. Bij eutrofiëring vindt een te grote toename in voedingsstoffen plaats, waardoor een bepaalde soort organismen sterk wordt gestimuleerd in groei en vermeerdering. Hierdoor worden andere soorten in dat ecosysteem benadeeld, waardoor de biodiversiteit afneem. Door eutrofiëring in de oceaan kan het zuurstofgehalte in de oceaan gaan dalen, met negatieve gevolgen voor de andere oceaanbewoners.

Kunstmatige bemesting van de oceaan is dus een zeer reële techniek om het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan te verbeteren. Daarbij moet er wel op gelet worden dat het in goede maten gebeurt. Als de oceaan overbemest wordt, zal de oceaan uit balans raken. (Ocean Carbon & Biogeochemistry Project Office, z.d.; Magalhaes Pires, 2019)

4.3 HET BESCHERMEN EN HERSTELLEN VAN BLAUWE KOOLSTOF-ECOSYSTEMEN

Om te voorkomen dat de CO_2 die nu al in de vorm van biomassa zit opgeslagen ontsnapt in de atmosfeer, is het belangrijk om blauwe koolstof-ecosystemen te beschermen. Tot blauwe koolstof-ecosystemen behoren alle ecosystemen in de oceaan en aan de kust, die CO_2 opnemen uit de oceaan gebieden (zie afbeelding 17). Deze ecosystemen krijgen het steeds zwaarder, omdat er steeds meer ruimte moet komen voor grote steden. De schatting is dat in 2025 ongeveer zes miljard mensen binnen 80 kilometer van de kust wonen (Creel, 2003). Hierdoor is er bijna geen ruimte voor de ecosystemen rond de oceanen om te groeien. Deze blauwe koolstof-ecosystemen zijn vaak zeer rijk aan biodiversiteit, en zijn zeer productief in het opslaan van CO_2. Onder dit soort ecosystemen ligt een hele grote hoeveelheid CO_2 opgeslagen in sedimentlagen. Het is daarom belangrijk om deze ecosystemen te beschermen en herstellen.



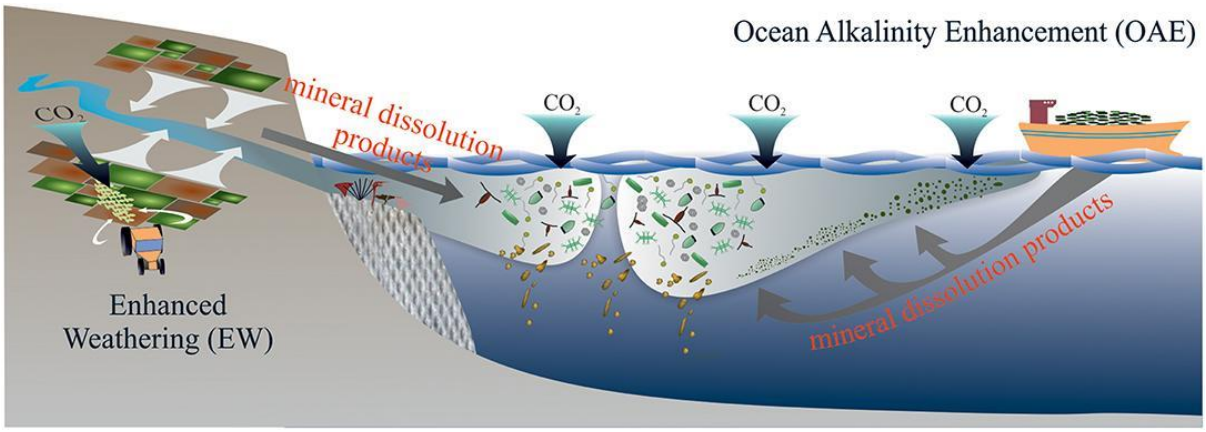
Afbeelding 17: Blauwe koolstof-ecosystemen slaan veel CO_2 op (Jennifer Howard, 2017)

Het beschermen en herstellen van de ecosystemen kan op verschillende manieren. We zouden bijvoorbeeld op grote schaal bomen kunnen herplanten. Er kunnen wetten worden opgesteld om de ecosystemen te beschermen. Ook kunnen de kustgebieden die gebruikt worden als overstroomgebieden kunstmatig gestimuleerd worden tot een blauw koolstof-ecosysteem met hoge biodiversiteit. Dit zijn allemaal manieren om ervoor te zorgen dat meer CO_2 wordt opgeslagen. Helaas zal dit wel veel geld en moeite kosten. Het is een investering die gemaakt moet worden om te voorkomen dat deze blauwe koolstof-ecosystemen binnenkort nergens meer te vinden zijn (Macreadie, 2017; 2019).

4.4 DE ALKALITEIT VAN DE OCEAAN VERBETEREN

Door de alkaliteit van de oceaan te verbeteren kan de CO_2-absorptiecapaciteit van de oceaan worden vergroot. De alkaliteit van de oceaan staat voor hoe goed de oceaan weerstand kan bieden tegen verandering in de pH. Op dit moment is de oceaan snel aan het verzuren. Een hogere alkaliteit in de oceaan zal zorgen voor minder verzuring. De alkaliteit kan verhoogd worden door de verwering van verschillende stenen te versnellen. Door het verweren van stenen komen er magnesium-, calcium- en natriumionen in de oceaan. Deze ionen reageren met carbonaat (ontstaan uit CO_2) en zinken vervolgens naar de bodem van de oceaan.

In de praktijk zouden bijvoorbeeld verpulverde silicaatrotsen of carbonaatmineralen gebruikt kunnen worden. Dit kan dan in een warm klimaat op akkerland of direct op het oceaanoppervlak toegevoegd worden (zie afbeelding 18). Hierdoor vindt opname van CO_2 plaats. De CO_2 wordt omgezet in carbonaten die in de oceaan kunnen reageren tot bijvoorbeeld calciumcarbonaat. Op deze manier kan CO_2 voor eeuwen op de bodem van de oceaan opgeslagen blijven.



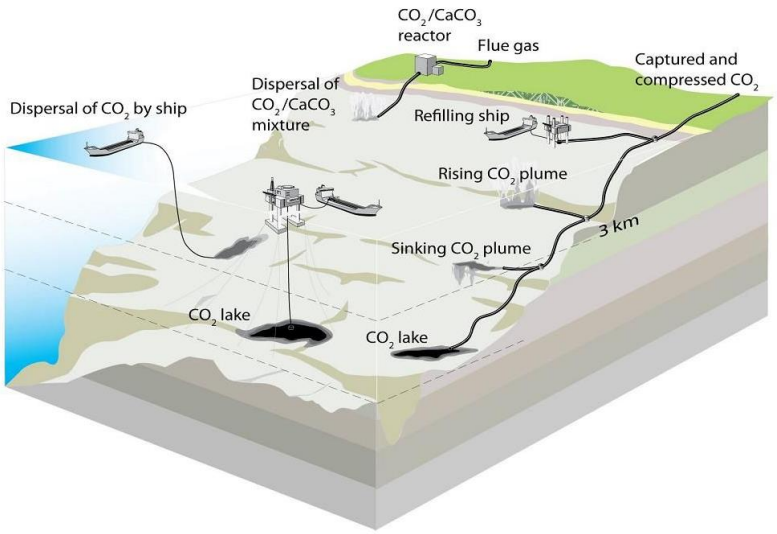
Afbeelding 88: Kunstmatig de alkaliteit van de oceaan verbeteren (Lennart T., 2019)

Deze techniek heeft meer voordelen naast het opslaan van CO_2. Calciumcarbonaat is namelijk een hele belangrijke voedingsstof voor veel oceaandieren. Doordat er meer calciumcarbonaat beschikbaar is, zal de groei voor deze oceaandieren gestimuleerd worden.

Helaas heeft ook deze techniek een groot nadeel. Voor deze techniek worden verschillende soorten stenen gebruikt om de CO_2 op te nemen. Deze stenen komen uit een industrieel proces, waarbij vaak veel CO_2-uitstoot bij vrijkomt. Alleen als deze techniek optimaal wordt uitgevoerd, zal dit proces meer CO_2 opnemen dan dat bij het industriële proces wordt uitgestoten. Het is belangrijk dat dit industriële proces goed verloopt, om de CO_2-uitstoot hierbij te beperken. (Renforth, 2017; Lennart, 2019)

4.5 CO_2-MEREN IN DE OCEAAN

Een andere manier om de oceaan te betrekken in het verminderen van de CO_2 is door het in zogenaamde 'CO_2-lakes' op te slaan in de oceaan. De CO_2 wordt uit de lucht gevangen en onder hoge druk in vloeibaar CO_2 veranderd. Omdat CO_2 in vloeibare vorm veel zwaarder is dan water, is het mogelijk om dit soort CO_2-meren op de bodem van de oceaan te vormen.



Afbeelding 19: Manieren om CO_2-meren te creëren in de oceaan (IPCC, 2005)

In praktijk komen er veel problemen kijken bij deze techniek. Een CO_2-meer heeft bijvoorbeeld een slechte invloed op de ecosystemen in de diepte van de oceaan. Ook kost het veel energie om de CO_2 vloeibaar te maken. Daarnaast is deze techniek relatief duur om toe te passen. De CO_2-meren moeten namelijk drie kilometer of dieper liggen. Het kost veel geld om de CO_2 te transporteren naar zulke dieptes. Het opslaan van CO_2 in deze meren is daarbij ook maar voor korte termijn. Na enkele decennia zal het grootste deel van de CO_2 weer ontsnapt zijn in de atmosfeer. (IPCC, 2005; Adams, 2008)

4.6 CONCLUSIE

In dit hoofdstuk is een aantal technieken besproken om het absorberend vermogen van de oceaan te verhogen. Het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan is dus op veel verschillende manieren te beïnvloeden. Hoewel er nog veel onderzoek naar gedaan moet worden, zijn de meeste technieken al ver ontwikkeld. Dit geeft een goed overzicht van de voor- en nadelen van elke techniek. Op basis hiervan is een oordeel te geven over hoe haalbaar deze techniek is in praktijk.(zie tabel 1). Vaak gaat de doeltreffendheid van de techniek gepaard met de hoge kosten of schade aan het milieu. Dit geeft aanleiding om verder te zoeken naar betere methoden en technieken.

Tabel 1: Een overzicht van voor- en nadelen voor methoden die het co2 absorberend vermogen van de oceaan vergroten

Methode	**Voordelen**	**Nadelen**	**Haalbaarheid**
Op grote schaal verbouwen van waterplanten	Goed voor klimaat en lokale economie	Relatief weinig invloed op CO_2-concentratie	Gemakkelijk
Kunstmatige bemesting van fytoplankton	Enorm grote invloed op CO_2-concentratie	Kan leiden tot eutrofiëring	Gemiddeld
Beschermen en herstellen van blauwe koolstof ecosystemen	Voorkomt uitstoot van grote hoeveelheden opgeslagen CO_2	Kost veel geld en moeite	Moeilijk
Alkaliteit van oceanen verbeteren	Slaat veel CO2 op, en stimuleert de groei van oceaandieren	Grote CO_2-uitstoot bij het industriële proces van de stenen	Gemiddeld
CO_2 meren in de oceanen	Gemakkelijk veel CO_2 opslaan	CO_2-uitstoot en hoge kosten bij het transport van de CO_2 en opslag is tijdelijke oplossing voor (relatief) korte termijn	Moeilijk

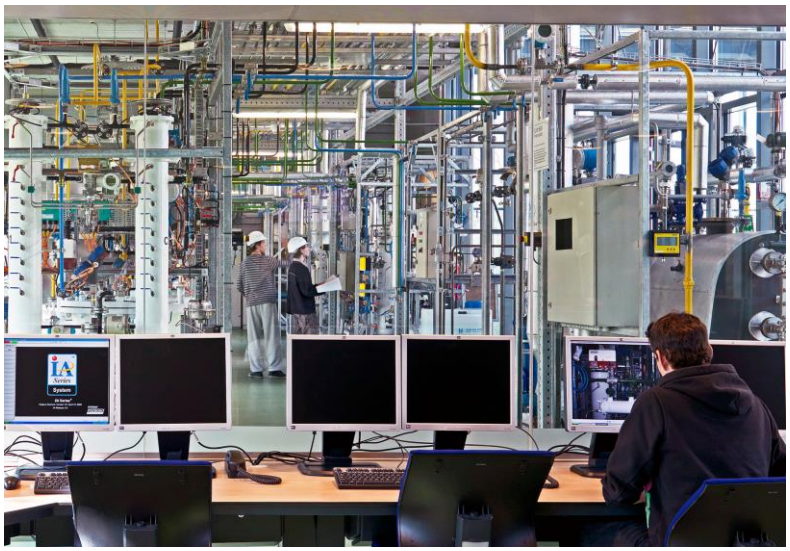
Aanvullend op de bestaande technieken heb ik in mijn onderzoek een experiment ontwikkeld op basis van het toevoegen van kalkwater. Deze methode wordt in het volgende hoofdstuk in detail uiteengezet.

5. EXPERIMENT: TOEVOEGING VAN CO_2 AAN KALKWATER

5.1 OPZET VAN HET EXPERIMENT

De aanleiding van dit onderzoek is om aan te tonen of het toevoegen van CO_2 aan kalkwater als methode gebruikt kan worden om het CO_2 absorberend vermogen van de oceaan te verhogen en de oceaanverzuring tegen te gaan. Met de technisch onderwijsassistent (TOA) van het Wolfert Dalton heb ik mijn onderzoeksvoorstel besproken. De uitkomst van dit gesprek was een ruw idee hoe we CO_2 konden vrijmaken en gebruiken als bron. Op dat moment wisten we nog niet welke reactie hierop kon volgen.

Om tot een reactievergelijking te komen heb ik meer informatie ingewonnen. Hiervoor heb ik de oefenfabriek van het Proces College van het STC in Brielle bezocht. De oefenfabriek is een realistisch nagemaakte chemische fabriek met veel voorkomende apparatuur uit de procesindustrie. Dit zijn apparaten zoals een reactor, warmtewisselaars, een stoomketel, pompen en tankopslag. Zoals in afbeelding 20 te zien is kan in de oefenfabriek geoefend worden op het bedienen en bewaken van machines en processen (STC-group, 2021).



Afbeelding 20: De oefenfabriek in Brielle (STC-group, 2021)

Daar ben ik in contact gekomen met de heer Dikkerboom, practor Energietransitie en Smart Industry. Met hem heb ik de reactie, de proefopstelling en benodigde hulpmiddelen besproken. In het gesprek met de heer Dikkerboom is het idee ontstaan om kalkwater te laten reageren met CO_2, zodat calciumcarbonaat ontstaat.

De onderzoeksvraag die aanleiding geeft tot het experiment is:
Zou het toevoegen van kalkwater aan oceaanwater het CO_2-absorberend vermogen kunnen verhogen?

In dit experiment wordt gekeken of CO_2 omgezet kan worden tot een bruikbare stof. In de praktijk zal dit ervoor kunnen zorgen dat de oceaan minder CO_2 bevat, waardoor het minder verzuurt. CO_2 kan reageren met kalkwater ($Ca(OH)_2$, een calciumhydroxide oplossing). Hieruit ontstaat calciumcarbonaat ($CaCO_3$) en water.

De reactie ziet er als volgt uit:

$$\mathbf{Ca(OH)_2\ (aq) + CO_2\ (g) \rightarrow CaCO_3\ (s) + H_2O\ (l)}$$

Calciumcarbonaat is een hele belangrijke bouwsteen voor veel organismen in de oceaan. Als deze reactie in praktijk op grote schaal toegepast kan worden, zal niet alleen de CO_2-concentratie dalen, maar ook de organismen zullen gestimuleerd worden in hun groei. Om erachter te komen of dit een effectieve oplossing kan zijn, wordt er gekeken naar hoeveel kalksteen ontstaat uit een bekende hoeveelheid CO_2 ontstaat.

De vraag voor het experiment is:
Hoeveel kalksteen ($CaCO_3$) ontstaat uit een bepaalde hoeveelheid CO_2?

Het experiment zou plaatsvinden in de Oefenfabriek van het Proces College en stond gepland op 20 december 2021. Helaas kon het experiment op het laatste moment niet doorgaan vanwege de lockdown van de scholen. Uiteindelijk is het experiment op school uitgevoerd.

5.2 HYPOTHESE

In water waar CO_2 zit, bestaat een bepaalde balans tussen koolstofdioxide, diwaterstofcarbonaat, waterstofcarbonaat en carbonaat. Uit het carbonaat reageert met calcium tot calciumcarbonaat. In de oceaan is de verhouding tussen deze stoffen:

CO_2	H_2CO_3	HCO_3^-	CO_3^{2-}
1%	0%	91%	8%

Bron: (IPCC, 2001)

De verwachting is dat bij toevoeging van CO_2 aan water het evenwicht van dit chemische evenwicht iets naar rechts zal verplaatsen. Het percentage van carbonaat is 8%, dus uit de bepaalde hoeveelheid CO_2 zal iets meer dan 8% vormen tot calciumcarbonaat.

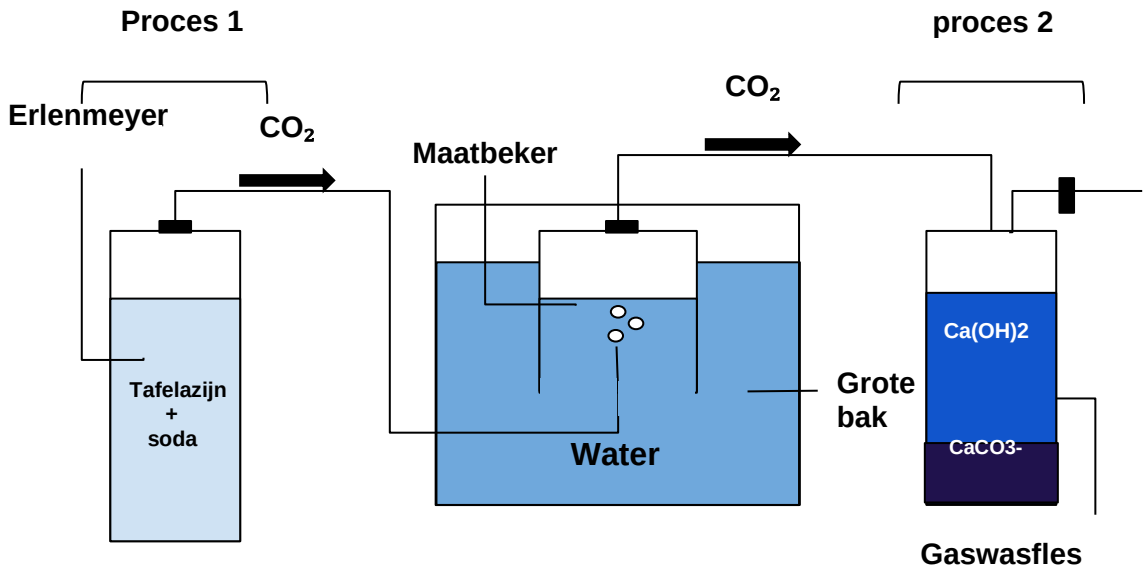
5.3 MATERIALEN EN OPSTELLING

Materialen:

- Gaswasfles
- Statief
- Grote bak
- Erlenmeyer (300 mL) afgesloten met een buisje
- Maatbeker (250 mL) afgesloten met een buisje
- Filtreerapparaat met butchertrechter
- Tafelazijn
- Soda
- Water
- Kalkwater ($Ca(OH)_2$)
- Weegschaal

Opstelling:
Onderstaand is de opstelling schematisch in beeld gebracht. In bijlage 1 zijn foto's opgenomen van het gehele proces.

Figuur 4.3.1: Opstelling van het experiment in 2 processtappen



5.4 METHODE

De erlenmeyer wordt gevuld met 100 mL tafelazijn en vervolgens in een statief vastgezet. Daarna wordt de grote bak gevuld met water. Op de maatbeker wordt een buisje gezet. Dit buisje blijft nu nog afgesloten. De maatbeker wordt in de volle bak met water ondergedompeld. Als de maatbeker volledig vol zit, wordt het omgedraaid. De maatbeker moet volledig gevuld zijn met water, om te voorkomen dat luchtbellen in de maatbeker komen.
Vervolgens wordt de maatbeker een klein stuk uit de bak met water gelift en vastgemaakt aan een statief. Nu wordt een uiteinde van een buisje gemonteerd aan de dop van de erlenmeyer. Het andere uiteinde wordt in de maatbeker gestoken.

Daarna wordt een bekende hoeveelheid soda toegevoegd in de erlenmeyer. Hierdoor ontstaat de reactie, waarin CO_2 vrijkomt. Deze CO_2 wordt via de buis naar de maatbeker geleid. Als de reactie in de erlenmeyer volledig gereageerd is, wordt genoteerd hoeveel CO_2 in de maatbeker zit. Vervolgens wordt de erlenmeyer gereinigd, en opnieuw gevuld met dezelfde hoeveelheid tafelazijn. Het buisje wordt nu vanuit de erlenmeyer aangesloten op de gaswasfles, die gevuld is met kalkwater. Nu wordt dezelfde hoeveelheid soda toegevoegd aan de erlenmeyer, waardoor de reactie plaatsvindt. Als de tafelazijn en de soda volledig gereageerd zijn, wordt de opstelling voor 5 minuten niet aangeraakt. Tijdens deze 5 minuten wordt het filtreerapparaat gereed gemaakt. Hierna wordt de vloeistof uit de gaswasfles in de butcher trechter geleegd. Als het filtreren voltooid is, wordt het filtreerpapiertje gedroogd. Vervolgens wordt de vaste stof op het filtreerpapier gewogen, en genoteerd. Als laatst wordt de gehele opstelling schoongemaakt en opgeruimd.

5.5 WAARNEMINGEN EN RESULTATEN

Voor aanvang van het experiment waren er al een aantal gegevens bekend:

Tabel 4.5.1. Input van het experiment bij proces 1

	Experiment 1	**Experiment 2**	**Experiment 3**	**Experiment 4**
Tafelazijn	100 ml	100 ml	100 ml	100 ml
Soda	10,0 g	5,0 g	2,5 g	2,5 g

Na toevoeging van de soda werd de CO_2 die ontstond in een maatbeker opgevangen. Deze maatbeker had een inhoud van 250 ml. Bij uitvoering van experiment 1 en 2 ontstond zo veel CO_2, dat de maatbeker vol raakte. Daarom wordt alleen verder gewerkt met experiment 3 en 4.
Om te meten hoeveel CO_2 er is ontstaan, wordt gekeken naar hoe vol de maatbeker zit na de reactie van tafelazijn en soda.

Tabel 4.5.2: Output van het experiment bij proces 1

	Experiment 3	**Experiment 4**
Inhoud CO_2 in maatbeker	151 ml	149 ml

Om te berekenen hoeveel gram CO_2 in het kalkwater is gegaan, wordt de dichtheid van CO_2 vermenigvuldigd met de inhoud van de maatbeker die gevuld was met CO_2.

Tabel 4.5.3: Input van het experiment bij proces 2

	Dichtheid CO_2 (BiNaS 12)	**CO_2 in gram**
Experiment 3	$1{,}986 \times 10^{-3}$ g/mL x 151 mL	0,2999 g
Experiment 4	$1{,}986 \times 10^{-3}$ g/mL x 149 mL	0,2959 g
Totaal	$1{,}986 \times 10^{-3}$ g/mL x 149 mL	0,5958 g

Vervolgens werd deze hoeveelheid CO_2 toegevoegd aan 100 mL kalkwater. Na de reactie is er een oplossing ontstaan met calciumcarbonaat en kalksteen. Deze oplossingen uit experiment 3 en uit experiment 4 worden samengenomen, en vervolgens gefiltreerd.

Tabel 4.5.4: Output van het experiment bij proces 2

	Gewicht filtreerpapier
Voor filtreren	0,429 g
Na filtreren	0,479 g

Na filtratie blijft een klein laagje calciumcarbonaat achter op het filtreerpapier. In totaal is in experiment 3 en 4 samen 0,479 - 0,429 = 0,050 gram kalksteen ontstaan.

6. CONCLUSIE EN DISCUSSIE

6.1 PROBLEEM ACHTERGROND

De laatste jaren lijkt de wereld te worden geteisterd door grote natuurrampen met vaak catastrofale gevolgen voor het leven op aarde. Een verklaring hiervoor wordt gegeven door David Attenborough die beschrijft dat door menselijk handelen (industrie, transport, en manier van leven) een aantal drempelwaarden zijn overschreden. Een van deze drempelwaarden is de hoeveelheid CO_2 die in de atmosfeer terecht komt, waardoor het broeikaseffect versterkt wordt. Als we leven op de planeet in haar huidige vorm en verscheidenheid in stand willen houden moet de CO_2-concentratie in de atmosfeer naar beneden. In dit onderzoek heb ik de rol van de oceanen beschreven. Van nature neemt de oceaan al veel CO_2 op, door middel van diffusie. CO_2 ziet de grens tussen het wateroppervlak en de atmosfeer niet als een groot obstakel. Door wisselwerking tussen oceanen en de atmosfeer proberen natuurlijke ecosystemen een balans te vinden tussen de concentratie van de CO_2 in de lucht en in het water. Dit natuurlijke proces wordt beïnvloed door waterstromingen aan de oppervlakte en in de diepten van de oceanen. De watertemperatuur heeft hier ook invloed op: des te kouder het water, des te meer CO_2 er afzinkt. Aan de evenaar komt warm water weer aan de oppervlakte en neemt het CO_2 mee naar boven.

Het natuurlijke proces van oceanen om CO_2 op te nemen is niet oneindig. In het tweede hoofdstuk hebben we gekeken naar wat de toenemende hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer doet met de oceaan. De stijging van de hoeveelheid CO_2 dat in de atmosfeer en oceaan aanwezig is, verandert de hele balans van de diffusie van CO_2. Door de grotere hoeveelheid CO_2 neemt de hoeveelheid waterstofcarbonaat (HCO_3^-) en carbonaat (CO_3^{2-}) ook toe. Hierdoor daalt de pH en verzuurd te oceaan. Naast de oceaanverzuring zorgt de stijgende CO_2-concentratie ook voor een warmere oceaan. Dit zorgt voor onbalans in voedselketens. Veel organismen zijn namelijk erg gevoelig voor temperatuurverschillen. Ook leidt de warmere oceaan tot thermische expansie en smeltende ijskappen. Hierdoor stijgt de zeespiegel, wat een nadelig gevolg heeft op de leefruimte van de mens.

Tot slot werden verschillende oplossingen beschreven die ervoor zouden kunnen zorgen dat de oceaan meer CO_2 opneemt. Deze zijn: waterplanten op grote schaal verbouwen, kunstmatige bemesting van fytoplankton, beschermen en herstellen van blauwe koolstof ecosystemen, de alkaliteit van de oceanen verbeteren en het aanleggen van CO_2 meren in de oceanen. Op basis van kennis uit de literatuur kunnen we concluderen dat bestaande technieken en methoden duur zijn, praktisch moeilijk haalbaar zijn of negatieve neveneffecten hebben op het milieu, zoals de eutrofiëring. CO_2 opslag in meren of aardlagen onder de oceanen is duur, er komt veel CO_2 vrij in het proces en het transport en biedt op geologische tijdschaal een tijdelijke oplossing. Dit gaf aanleiding tot mijn eigen onderzoek. In mijn experiment is onderzocht of kalkwater samen met CO_2 ervoor zou kunnen zorgen dat het CO_2-absorberend vermogen van de oceaan verhoogd kon worden zonder de balans te verstoren.

6.2 ANTWOORD OP DE ONDERZOEKSVRAAG

De onderzoeksvraag was:

Zou het toevoegen van kalkwater aan oceaanwater het CO_2-absorberend vermogen kunnen verhogen?

Om deze vraag te beantwoorden heb ik een eigen experiment opgezet en uitgevoerd. Om te meten hoeveel invloed kalkwater heeft, was de onderzoeksvraag voor het experiment:

Hoeveel kalksteen ($CaCO_3$) ontstaat uit een bepaalde hoeveelheid CO_2?

Uit de resultaten blijkt dat uit 0,5958 gram CO_2 in totaal 0,050 gram kalksteen is ontstaan. Omdat dit experiment op kleine schaal is uitgevoerd, is de hoeveelheid kalksteen die ontstaan niet groot. In praktijk is het mogelijk om dit proces op te schalen, waardoor wel veel kalksteen ontstaat. In paragraaf 6.2 wordt verder uitgelegd wat de mogelijkheden zijn rond het opschalen van dit proces.

De hypothese zegt dat uit 100% CO_2 8% kalksteen gevormd zal worden. Dat zou betekenen dat uit 0,5958 gram CO_2 0,048 gram kalksteen ontstaat. De aanname dat de theoretische balans tussen CO_2 en calciumcarbonaat zou bepalen hoeveel kalksteen ontstaat is dus correct.

Het toevoegen van kalkwater aan oceaanwater zal in theorie ervoor zorgen dat de CO_2 opgeslagen wordt in de vorm van calciumcarbonaat. Daardoor wordt er meer CO_2 in het oceaanwater opgenomen. Daarnaast kan de kalksteen gebruikt worden door verschillende oceaandieren. De reactie die ik heb gebruikt in het experiment komt dicht bij het natuurlijke proces van organismen in de oceaan zoals walvissen, koraal of schelpen CO_2 omzetten. Zij gebruiken calciumcarbonaat als bouwstof voor hun botten of schalen. Als zij doodgaan, zinkt het geraamte naar de bodem van de oceaan. Kijkend naar de resultaten van het experiment mag geconcludeerd worden dat het ontstaan van meer kalksteen en het absorberen van CO_2 door de toevoeging van kalkwater het leven in de oceaan stimuleert.

6.3 BEPERKINGEN VAN HET ONDERZOEK

Er zijn wel wat beperkingen aan het onderzoek. In de eerste plaats is het een kleinschalig onderzoek. In de waarnemingen is te zien dat alleen verder gerekend is met experiment 3 en 4. Dit komt doordat in experiment 1 en 2 de hoeveelheid CO_2 niet gemeten kon worden, omdat de maatbeker te klein was voor deze hoeveelheid. Er was een te grote hoeveelheid soda gebruikt. Dit had voorkomen kunnen worden door vooraf beter theoretisch onderzoek te doen naar deze reactie, om zo een voorspelling te maken voor de hoeveelheid soda.

Bij het filtreren werd de gaswasfles, die gevuld was met de oplossing met calciumcarbonaat en kalksteen, leeggegoten in de trechter van het filtreerapparaat. Bij het leeggieten bleef een kleine hoeveelheid achter in de gaswasfles. Dit kan zorgen voor een kleine afwijking in de resultaten. Deze kleine afwijking had voorkomen kunnen worden door de gaswasfles opnieuw te vullen met gedestilleerd water, om het vervolgens weer leeg te gieten in de trechter.

Een belangrijk vervolgonderzoek is om te bepalen waar de reactie het beste kan plaatsvinden: als industrieel proces of in de oceaan zelf. Op dit moment wordt er veel onderzoek gedaan naar technieken om CO_2 op te slaan in de oceaan. Het experiment dat ik heb uitgevoerd zou een van de nieuwe onderzoeksrichtingen kunnen zijn.

Als deze techniek in praktijk op grote schaal zou worden uitgevoerd, komt er wel meer bij kijken. De industrie speelt een belangrijke rol bij de Energie Transitie en het haven-industrieel complex in Rotterdam biedt een zeer goede infrastructuur voor verder onderzoek. Als vervolgonderzoek zou bijvoorbeeld gekeken kunnen worden naar hoe de reactie van kalkwater met koolstofdioxide opgeschaald kan worden. Zo komt bij het maken van grote hoeveelheden kalkwater CO_2 vrij. Dit moet worden opgevangen en waar nodig tussentijds worden opgeslagen. In het productie en transportproces zal mogelijk CO_2-uitstoot ontstaan, indien deze processen nog fossiele brandstoffen worden gebruikt. De inschatting is dat deze uitstoot beperkt zal zijn. Dit onderzoek zou kunnen plaatsvinden in de Oefenfabriek bij het STC in Brielle, waar op een iets grotere schaal kan worden geëxperimenteerd.

Daarnaast is het interessant om te kijken naar de effecten van opschaling hebben op de natuur: wat gebeurt er als er calciumcarbonaat produceert en wat doet het met het ecosysteem in de oceaan. Hoe reageren organismen in de oceaan op deze plotselinge toename van calciumcarbonaat in het ecosysteem.

LITERATUURLIJST

Andersen, P. (Regisseur). (2016). *Coral Bleaching* [Film].

Andersen, P. (Regisseur). (2016). *Ocean Acidification* [Film].

Astrid C. Wittmann, H.-O. P. (2013). Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature*.

Attenborough, D. (2020). *Een leven op onze planeet: een terugblik en een toekomstvisie.* (N. Brinkman, Vert.) Uitgeverij Luitingh-Sijthoff.

Bars, D. l. (2019, november 14). *De rol van oceanen, sneeuw en ijs in het klimaat.* Opgehaald van RIVM: https://magazines.rijksoverheid.nl/knmi/knmispecials/2019/03/systeem

Borunda, A. (2019, augustus 14). Ocean warming, explained. *National Geographic*.

Catharina J. M. Philippart, H. M. (2003). Climate-related changes in recruitment of the bivalve Macoma balthica . *ASLO*.

Christopher D. G. Harley, A. R. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*.

Creel, L. (2003). Ripple Effects: Population and Coastal Regions. *Population Reference Bureau*.

Duarte Carlos M., W. J.-J. (2017). Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? *Frontiers in Marine Science*.

E. Eric Adams, K. C. (2008). *Ocean Storage of CO2.*

Encounter Edu. (z.d.). What is the marine carbon cycle?

Falkowski, P. (2012). Ocean Science: The power of plankton. *Nature*.

Hannah Ritchie, M. R. (2020). CO_2 and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*.

IGBP, IOC, SCOR. (2013). *Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High-CO2 World*. Stockholm, Sweden: International Geosphere-Biosphere Programme.

IPCC. (2001). *Climate Change 2001, The Scientific Basis.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013 The Physical Science Basis.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report.* Geneva, Switzerland.

IPCC. (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.*

IUCN. (2017, November). *Ocean Warming.* Opgehaald van IUCN: https://www.iucn.org/sites/dev/files/ocean_warming_issues_brief_final.pdf

Jean-Pierre Gattuso, L. H. (2011). Ocean Acidification. Oxford.

Jennifer Howard, A. S.-G. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers In Ecology And The Environment*.

John M. Guinottea, V. J. (2008). *Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems.* New York, USA: New York Academy of Sciences.

Jose Carlos Magalhaes Pires, A. L. (2019). Bioenergy with Carbon Capture and Storage: Using Natural Resources for Sustainable Development. Academic Press.

Katie L. Barott, A. A. (2015). Coral host cells acidify symbiotic algal microenvironment to promote photosynthesis. *PNAS*.

KIØRBOE, T. (2001). Formation and fate of marine snow: small-scaleprocesses with large-scale implications. *Scientia Marina*.

Kranendonk, R. B. (2013). BiNaS. Noordhoff Uitgevers.

Lennart T. Bach, V. T. (2021). Testing the climate intervention potential of ocean afforestation using the Great Atlantic Sargassum Belt. *Nature*.

Lennart T., G. S. (2019). CO2 Removal With Enhanced Weathering and Ocean Alkalinity Enhancement: Potential Risks and Co-benefits for Marine Pelagic Ecosystems . *Frontiers in Climate*.

Macreadie, P. A. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature*.

Malin G., S. M. (2004). *Dimethyl sulfide production: what is the contribution of the coccolithophores?* Berlin, Heidelberg: Springer.

Maroto-Valer, M. M. (2010). Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO2) Capture and Storage Technology. Elsevier.

Mathiesen, K. (2017, januari 5). *Coral bleaching to hit reefs every year from mid-century, says UN*. Opgehaald van climate home news: https://www.climatechangenews.com/2017/01/05/coral-bleaching-to-hit-reefs-every-year-from-mid-century-says-un/

NASA earth observatory. (2008). Defying Expectations.

National Geographic Society . (2019, oktober 21). *Ocean*. Opgehaald van National Geographic: https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/ocean/

NOAA. (2021, september). *Climate at a Glance: Global Time Series*. Opgehaald van NOAA: https://www.ncdc.noaa.gov/cag/

Ocean Carbon & Biogeochemistry Project Office. (z.d.). Ocean Fertilization, Implications for marine ecosystems: Supporting research and improved understanding.

OceanNETs. (z.d.). Ocean Fertilization.

Okon, M. (2019). *The Current State of Coral Reefs.* Nature, https://www.pbs.org/wnet/nature/blog/the-current-state-of-coral-reefs/.

Peter I Macreadie, D. A.-T. (2017). Can we manage coastal ecosystems to sequester more blue carbon? *Frontiers in Ecology and the environment*.

R.E. Zeebe, D. W.-G. (2001). *CO2 in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes.*

Rau, G. H. (2007). Enhancing the Ocean's Role in CO2Mitigation. *ResearchGate*, 817-824.

Rau, G. H. (2010). *CO Mitigation via Capture and 2 Chemical Conversion in Seawater.* Institute of Marine Sciences, University of California, Santa Cruz, California.

Rebecca Lindsey, M. S. (2010). *What are Phytoplankton?* NASA earth observatory.

Renforth, P. (2017, augustus). Preventing climate change by increasing ocean alkalinity. *Eos*.

Richard Feely, P. T. (2021, december 6). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Opgehaald van NOAA: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/

Riebesell, U. (2004). Effects of CO2 Enrichment on Marine Phytoplankton. *Journal of Oceanography volume*.

Royal Society, US National Academy of Sciences. (2020). *Climate Change Evidence & Causes.*

STC-group. (2021). *Oefenfabriek*. Opgehaald van STC-group: https://stc-group.nl/faciliteiten/oefenfabriek/

Union of Concerned Scientists. (2019). CO2 and Ocean Acidification: Causes, Impacts, Solutions.

Warneck, P. (2003). *Encyclopedia of physical science and technology*.

BIJLAGE 1: FOTO'S VAN HET EXPERIMENT

Foto 1: De opstelling van proces 1

Foto 2: De opstelling van proces 2

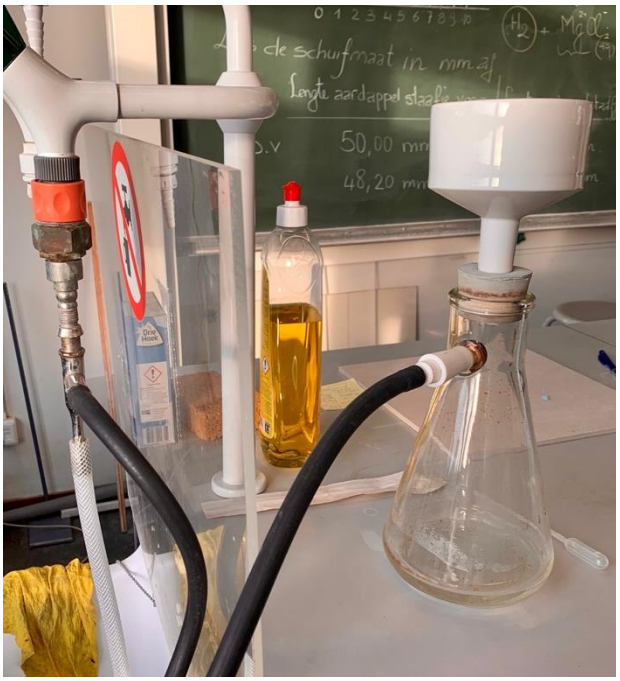


Foto 3: De opstelling van het filtreerproces

Foto 4: Het resultaat, 0.050 gram kalksteen